

그래핀 기반 나노소자 기술

그래핀(Graphene)은 Fullerene(C60, Buckyballs 1985년 발견), CNTs(Carbon nanotubes 1991년 발견)와 같은 탄소동소체의 하나로 연필심의 재료인 흑연의 한 층을 가리키는 말이다(그림 1). 풀러린과 탄소나노튜브가 발견된 이후 이들 물질에 대한 많은 연구가 진행되어 왔으며 2004년 맨체스터대학의 안드레 제임(Andrea Geim)과 콘스탄틴 노보셀로프(Konstantin Novoselov)에 의해 그래핀이 발견된 이후에도 빠른 속도로 연구가 진행되고 있다.

의 약 20배)을 동시에 가지고 있다.

이렇게 중요한 성질을 갖는 물질이라 해도 그래핀이 단기간에 수많은 사람들의 연구주제로 발전하게 된 배경에는 스카치테이프로 간단하게 시편을 제작하기 시작하여, 2009년부터는 CVD(화학기상 증착)로 대면적인 합성이 가능했기 때문이다. 그래핀은 탄소나노튜브처럼 높은 전기전도도를 보여주면서 상대적으로 제어하기 쉬운 반도체 소자제작 기법을 직접 적용하여 top-down 방식의 고집적 회로제작이 가능하다는 큰 장점을 가지고 있다.

2차원 전자계의 독특한 물리적 특성의 연구는 그 현상의 발견과 더불어 응용소자 적용이 가능하여 산업 발전 측면에서도 매우 중요하게 생각되고 있다. 현재 그래핀은 전기적, 물리적 특성의 우수성을 바탕으로 유연하고 투명한 디스플레이와 차세대 나노 전자·광전 소자로 주목받는 신소재이다.

신소재로 주목받는 그래핀의 특성

원자 한 층의 두께를 가지고 있는 그래핀은 밴드갭이 없는 밴드구조를 가져 전도성을 보이고 있으나, 페르미 준위에서 전자의 상태 밀도가 '0'인 반금속 물질의 특성을 보이고, 도핑 정도에 따라 전하 운반자의 종류 및 밀도를 변화시킬 수 있는 양극성 전도 특성을 나타낸다. 그래핀의 전자는 질량이 없는 디랙입자로 정의되며 이는 실리콘 내 전자보다 20배 이상 빠른 전자이동도($200,000\text{cm}^2/\text{V}\cdot\text{s}$)를 설명해준다. 전기적 특성 외에 우수한 광학적 특성(약 97%의 투과도), 기계적 특성(철보다 5배 높은 영률), 열전도율(구리

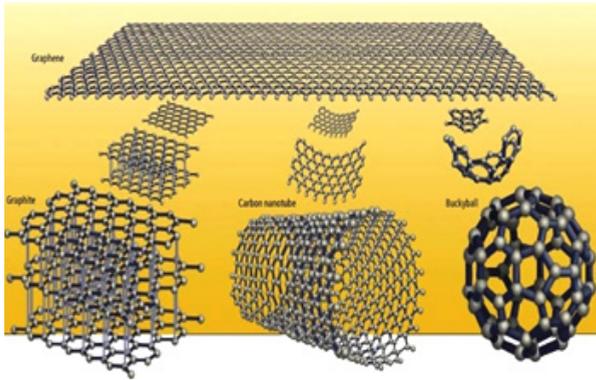
그래핀 연구 로드맵

모든 산업분야에서 주목을 받고 있는 그래핀은 2010년 노벨물리학상을 받으면서 그 중요성을 인정받았으며, 미국, 유럽, 싱가포르, 한국 등에서는 정부차원

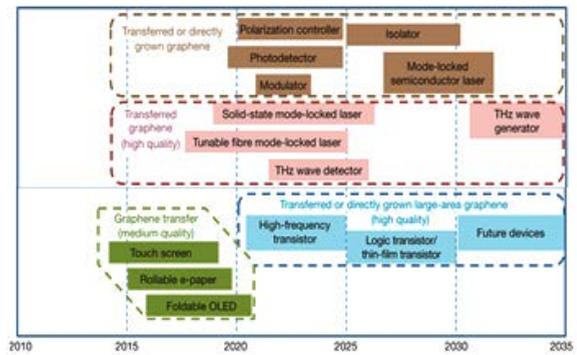


글_최춘기
한국전자통신연구원
그래핀소자창의연구센터장
cgchoi@etri.re.kr

글쓴이는 성균관대학교 금속공학과를 졸업 후, 프랑스 스트라스부르 루이파스퇴르 대학교에서 DEA 학위를, 프랑스 오를레앙대학교에서 물리학 박사학위를 받았다. 현재 한국전자통신연구원 그래핀소자창의연구센터에서 그래핀 합성 및 그래핀 전자·광전 소자와 메타물질 기반 이미징 및 홀로그램 소자에 관한 연구를 진행하고 있다.



▶▶ 1. 0차원부터 3차원의 탄소 동소체(A. K. Geim et al., Scientific American, 298(4), 90 (2008))



▶▶ 2. 그래핀 소자 연구 로드맵(K. S. Novoselov et al., Nature, 490, 192 (2012))

의 중장기 연구 지원 계획을 바탕으로 기초, 원천연구 분야에 집중적인 연구가 진행되고 있다. 미국에서는 국방부 산하 국방첨단연구기획청, IBM, 휴즈연구소, MIT 등에서 차세대 초고속 그래핀 칩 개발을 목표로 하고 있으며, 유럽에서는 연 1억 유로 수준인 Flagship mega project를 진행 중이다. 또한 싱가포르 대학에서는 총 5천만 달러를 투자해서 국립 그래핀 연구센터를 설립하여 연구에 매진하고 있다.

현재 다양한 응용소자의 실용화를 위해 구조적 결합 극복이나 성능 향상 연구가 매우 활발하다. 따라서 장기적으로 소자 응용의 난제들을 해결함으로써 신개념 전자·광전 소자 개발이 가능해질 것이다(그림 2). 따라서 그래핀의 전기적, 광학적, 기계적 특성을 이용한 전자소자와 광전소자 등의 응용소자에 관한 내용과 향후 연구분야에 대해 살펴보려고 한다.

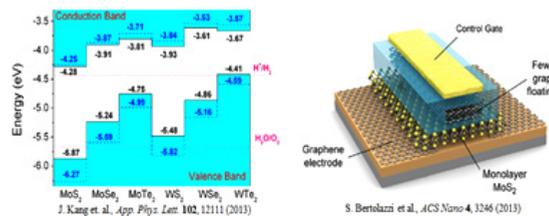
그래핀 및 이차원 물질 이종접합 전자소자

높은 전자이동도를 가짐으로써 그래핀의 전자소자로서의 응용성이 높음에도 불구하고 밴드갭 (bandgap)이 없어 온오프 비율(on-off ratio)이 낮다는 문제점이 대두되면서 그래핀을 트랜지스터 채널로 응용하는데 어려움이 있다. 최근, 이런 문제점을 해결하고자 그래핀과 같은 이차원 구조이면서 반도체 특성을 가지고 있는 transition-metal dichalcogenides(TMDS)를 트랜지스터 채널로 적용하는 연구들이 진행되고 있다(그림 3. (a)).

이러한 TMDS의 경우 다른 밴드갭 및 일함수 (work-function)를 가지고 있기 때문에 원하는 에너지 구조를 선택하여 채널로 사용할 수 있으며, 다른 TMDS들의 이종 접합구조로부터 피-엔 접합(p-n junction) 구조 구현도 가능하다. TMDS와 그래핀과의 이종 접합으로부터 트랜지스터, 메모리 소자 등 응용 소자 구현에 대한 연구가 활발히 진행되고 있다(그림 3. (b)).

그래핀 화학 가스 센서

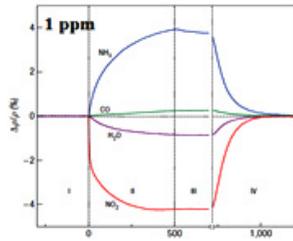
그래핀은 전자가 움직이는 채널의 두께가 매우 얇기(단일 층=0.3nm) 때문에 표면에 다른 분자단위 물질들이 붙으면서 쉽게 페르미 에너지 준위(Fermi energy level)가 변하는 특성을 가지고 있다. 이러한 특성을 이용해서 화학적 분자 가스센서로의 응용연구를 진행하고 있다. 즉 그래핀의 표면에 붙는 분자의 특성이 그래핀에 전자를 더 주거나, 빼앗는 특성에 의



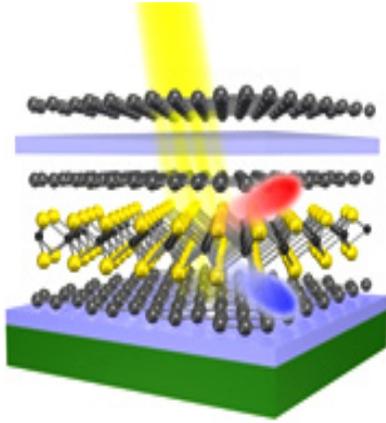
▶▶ 3. (a) TMDS 물질들의 밴드갭 비교, (b) Graphene-MoS₂ 이종접합메모리 소자



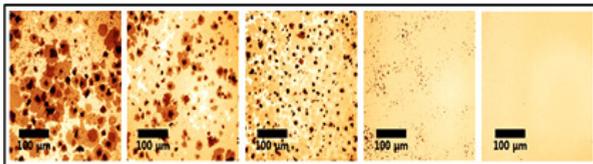
F. Schedin et al. *Nature Mater.* 6, 652 (2007)



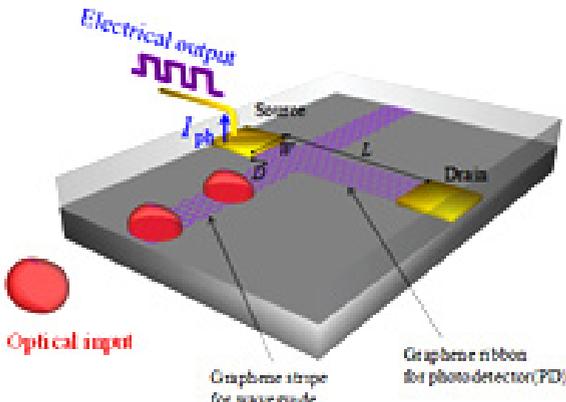
▶▶ 4. 그래핀 가스센서



▶▶ 5. Graphene-MoS2 이종접합 광검출기(W. J. Yu et al., *Nature Nanotechnol.* 8, 952 (2013))



▶▶ 6. 층수가 제어되며 대면적으로 합성된 그래핀의 현미경 사진



▶▶ 7. 평면형 그래핀 광검출기

해 그래핀의 전도도가 초기 상태와 비교해서 상대적으로 높아지거나 낮아지는 변화를 볼 수 있다. 이로부터 분자 가스들이 존재함을 확인할 수 있는 가스센서 제작이 가능하다(그림 4).

그래핀을 이용한 가스센서 연구는 현재 각 분자에 따른 측정 감응도(sensitivity)를 높이는 방향과 한번에 다른 분자들을 구별해낼 수 있는 분별력(selectivity)을 가지고 있는 가스센서를 구현하는 연구방향으로 진행되고 있다.

넓은 파장대역에서 작동되는 그래핀 광검출기

그래핀은 UV 대역에서부터 THz 대역까지 흡수하므로, 그래핀 기반의 광검출기는 기존의 반도체 기반 광검출기보다 넓은 파장대역에서 작동될 수 있다. 그러나, 그래핀은 한 개 층이 약 2.3%의 입사 빛을 흡수하므로 광전변환 효율이 다소 낮다.

이러한 단점을 극복하기 위해 최근에는 그래핀에 MoS₂, WS₂, Ta₂O₅ 등의 2차원 물질을 결합시킨 하이브리드형 그래핀 광검출기가 연구되고 있다(그림 5). 이들 소자는 외부 양자효율을 55%, 내부 양자효율을 85%까지 향상시키고 있다.

그래핀 투명전극

탄소원자 한 층으로 이루어져 있는 그래핀은 빛의 투과도(97.7%)가 뛰어날 뿐 아니라 작은 비저항($10^{-6} \Omega \cdot cm$, 이론)으로 인해 투명함과 유연함을 동시에 가지는 투명 전극으로의 활용성에 대한 기대가 높다. 그러나, 원자 한층의 막 구조를 이용하기 위해서는 그 형태를 유지시킬 수 있는 기판으로의 전사가 필수적이다.

이 과정에서 그래핀의 저항이 높아지는 결과를 초래하게 된다. 이를 극복하기 위해 그래핀에 도핑을 하거나 적층하여 저항을 낮추는 방법들이 활발히 연구되고 있고, 실제 소자 구현을 통해 가능성을 보여주고 있다.

ETRI 그래핀소자창의연구센터 연구성과

한국전자통신연구원 그래핀소자창의연구센터는 국내 최고수준의 그래핀 연구 인프라를 구축하여, 그래핀의 성장, 전사, 분석, 그리고 다양한 응용 전자-광



전소자의 개발을 수행하고 있으며, 연구개발 성과에 대해 살펴보고자 한다.

CVD 기반 그래핀 합성 및 전사 기술

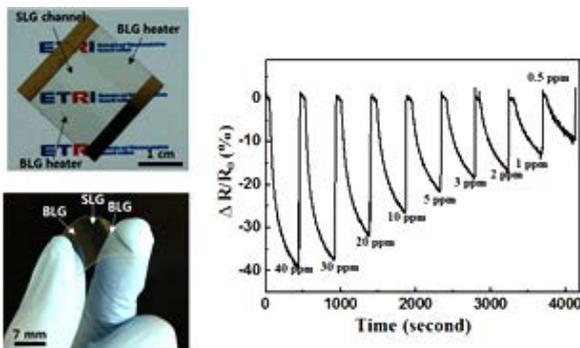
대면적 그래핀은 일반적으로 단일 금속 촉매를 이용하여 화학기상증착법(CVD)으로 단일 층 또는 다층을 합성시킨다. 본 센터에서는 복합 금속 촉매층을 이용하여 그래핀 성장과정에서 대면적 그래핀(6인치)의 층수를 제어하는 기술을 개발하였다(그림 6).

본 기술개발을 통해 응용 소자에서 요구하는 투명도와 저항을 제어할 수 있으며, 플렉서블 센서, 플렉서블 트랜지스터, 유연 투명 전극, 플렉서블 광전집적 회로 시스템과 같은 그래핀을 이용한 투명 유연 소자들의 개발에 비약적 발전을 가져올 것으로 기대된다.

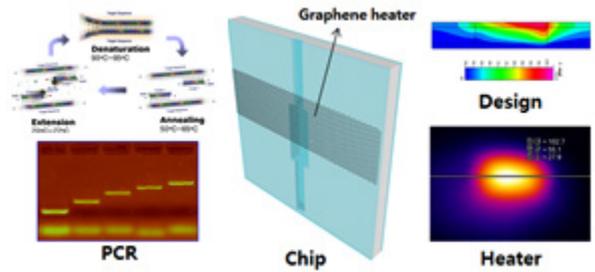
평면형 그래핀 광검출기

기존의 그래핀 광검출기들은 그래핀 면에 수직으로 입사하는 광 신호를 주로 검출하므로 평면형 광소자에 적용하는데 어려움이 있었다. 이러한 구조적 단점을 보완하기 위하여 평면형 그래핀 광검출기를 개발하고 있다.

개발하는 광소자의 구조는 광신호를 전송하는 그래핀 스트립과 스트립에 수직으로 배치된 그래핀-금속 구조 광검출기로 구성된다. 그래핀 스트립을 통해 수평방향으로 전송된 광신호는 그래핀-금속 광검출기에서 홀-전자 쌍을 생성하고, 인가된 바이어스 전압에 의해 광전류를 생성한다. 제작된 평면형 그래핀 광검출기는 인가된 광세기의 시간적 변화에 대하여 39.7ms의 광반응성 특성을 보인다. 상기



▶▶ 8. 투명하며, 휘어지는 히터를 포함한 그래핀 가스센서



▶▶ 9. 그래핀 기반 유전자 증폭-검출 칩

연구결과는 2014년 1월 7일 Optics Express에 게재되었다(그림 7).

그래핀 히터 접합 그래핀 가스센서

투명하며 휘 수 있는 그래핀의 고유한 특성을 유지하고, 측정 후 초기화 단계의 효과적인 동작을 위해 그래핀을 센서로의 사용 뿐만 아니라 히터로도 사용한, 투명하며 휘 수 있는 그래핀 가스센서 개발을 진행하고 있다. 그래핀을 이용한 센서 및 히터를 함께 구현한 센서로부터 0.5ppm에서도 10%의 저항 변화도의 감지도와 센티미터 크기의 채널도 20초 이내로 초기화할 수 있는 우수한 센싱 성능을 가지고 있다. 상기 연구결과는 2014년 7월 Small에 게재되었다(그림 8).

그래핀 기반 PCR 칩

CVD 그래핀의 높은 투명도, 열전도도, 유연성을 이용한 유전자 증폭-검출(Polymerase Chain Reaction) 칩을 개발하고 있다. 저전력, 높은 내구성을 갖는 투명 그래핀 히터를 적용하여, 유전자 증폭 및 유전자 형광 검출에 이용하고 있다. 또한, 산화그래핀의 높은 열전도도는 유전자 증폭의 특이도 향상에 기여한다. 이를 통해 그래핀 기반 고속·고효율·휴대형 유전자 진단장치 개발을 목표로 연구를 진행하고 있다(그림 9).

이 외에도 초고속 그래핀 트랜지스터, 그래핀 투명 전극, 플렉서블 회로 인터커넥션 기술 개발과 더불어 KAIST, 건국대학교, 성균관대학교 등과 응용 소자 개발을 위한 공동연구를 진행하고 있다.